

Penelitian Kerusakan Pada Sebuah Pipa Ketel Uap

D.N. Adnyana

Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur (B2TKS), BPPT
Kawasan PUSPIPTEK, Serpong, Tangerang 15314
Telp: 021-7560562, Pes: 1011, Fax: 021-7560903, E-mail: puncak@cbn.net.id

ABSTRACT: *Failure Investigation on Ruptured Boiler Tube, This paper presents a failure investigation on a ruptured steam boiler tube. This boiler tube was made of low carbon steel, having 76.1 mm outside diameter and 5 mm thickness. The boiler tube was installed in horizontal position on the front rear walls of a steam boiler that was operated at steam pressure and temperature of 60 bar and 275°C, respectively. The failure investigation was carried out by performing a number of examinations including: macroscopy, metallography, hardness test and scanning electron microscopy (SEM) equipped with EDS (energy dispersive spectroscopy). Results of the failure investigation showed that the failure on the boiler tube was most likely caused by a short term localized overheating. The overheating temperature was estimated to have reached about 700 – 850°C. This was indicated by the formation of bainite and/or martensite microstructure in some location of the ruptured tube material. Since no any significant scale formation was observed in the tube internal wall, and also no any obvious indication of possible overheating due to a direct burner flame impingement toward the tube outside surface, it was therefore concluded that the occurrence of short term localized overheating on the tube was most probably caused by low water level in that particular part of the boiler tube.*

Keywords: *steam boiler tube, short term localized overheating, burner, water level*

PENDAHULUAN

Penelitian kerusakan telah dilaksanakan terhadap sebuah pipa ketel uap (*boiler tube*) yang pecah milik dari sebuah pabrik di Medan. Pipa ketel uap itu terbuat dari baja karbon rendah dengan spesifikasi St 35,8 III dan memiliki diameter luar 76,1 mm serta tebal 5 mm. Pipa tersebut terpasang di bagian *front rear walls* pada posisi mendatar dari sebuah ketel uap (*boiler*) yang bekerja pada tekanan uap 60 bar dan dengan suhu uap 275 °C.

Potongan pipa ketel uap yang pecah tersebut dengan panjang sekitar 1000 mm dan dengan kedua ujungnya memiliki *reducer* ditunjukkan pada Gambar 1. Pada bagian pipa yang pecah terbentuk gelembung (*bulging*) yang cukup besar dan sebagian tebal bibir pipa yang pecah mengalami penipisan hingga mencapai sekitar 4 mm, Gambar 2. Penipisan itu kemungkinan besar disebabkan oleh deformasi plastis yang terjadi akibat kondisi *overload* yang berlangsung di bagian pipa yang pecah tersebut sesaat sebelum pipa pecah.

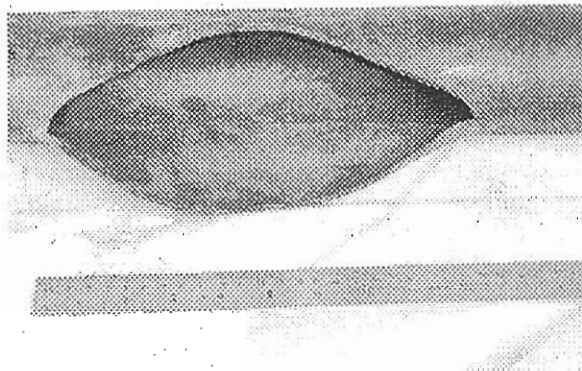
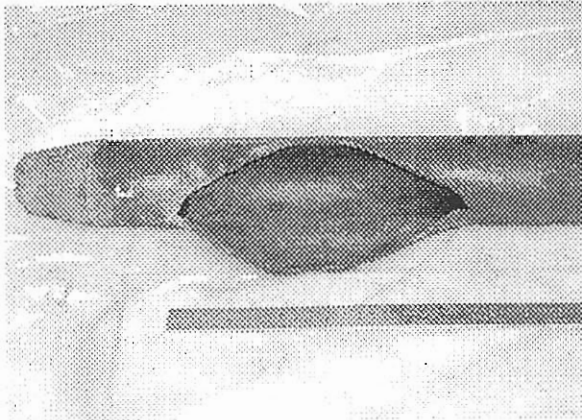
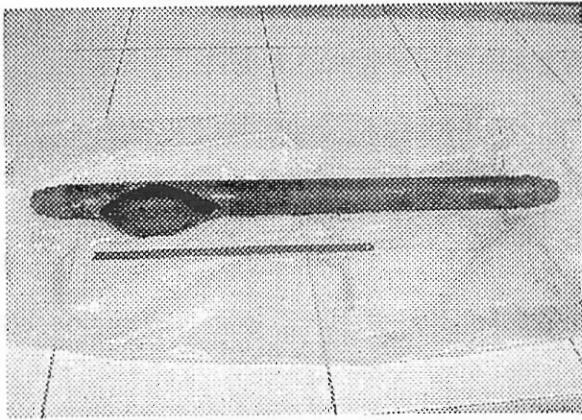
Tujuan dari penelitian adalah untuk menentukan jenis dan faktor penyebab kerusakan yang terjadi pada pipa ketel uap (*boiler tube*) tersebut, sehingga kemudian dapat dilakukan langkah-langkah pencegahan agar kerusakan yang serupa tidak terjadi lagi di kemudian hari.

Pipa ketel uap umumnya dibuat dari baja karbon rendah dengan struktur mikro terdiri dari campuran ferit dan perlit. Untuk pertimbangan operasi jangka panjang, suhu maksimum pengoperasiannya didesain mencapai 400 °C. Pada suhu tersebut diharapkan baja karbon rendah belum mengalami proses rekristalisasi dan karenanya dapat terhindar dari peristiwa *creep* dan/atau ketidakstabilan metalurgi lainnya [1,2]. Akan tetapi

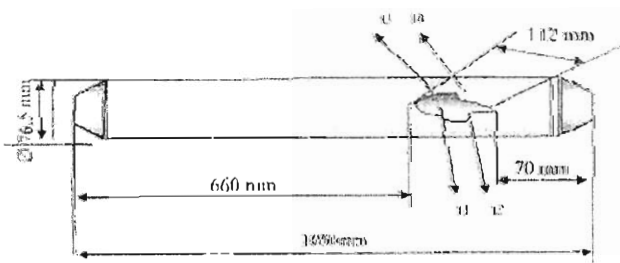
karena sesuatu hal dalam pengoperasiannya, pipa ketel uap dapat mengalami peristiwa *overheating* yang bersifat lokal dimana suhu-nya dapat mencapai di atas suhu maksimum. Apabila suhu *overheating* tersebut mencapai sekitar 450–700°C, maka kejadiannya dikategorikan sebagai *long term overheating*. Sedangkan apabila suhu *overheating*-nya mencapai di atas 700°C, maka peristiwa tersebut dikategorikan sebagai *short-term overheating*. Kejadian *long-term overheating* biasanya ditandai dengan terbentuknya struktur *sperodisasi karbida* dan/atau grafit serta pembentukan sejumlah *creep cavitations*. Sedangkan pada kejadian *short-term overheating*, karena suhunya mencapai di atas suhu transformasi, maka struktur baja pipa ketel uap akan mengalami transformasi menjadi campuran ferit dan austenit. Pembentukan fasa austenit diikuti dengan penurunan kekuatan baja yang sangat drastis sehingga seketika itu pipa ketel uap akan pecah. Pecahnya pipa ketel uap, mengakibatkan uap yang bercampur air akan menyembur keluar dan langsung membasahi/mendinginkan bagian pipa yang sebelumnya pernah mencapai suhu 700 – 850 °C sehingga fasa austenit akan bertransformasi menjadi struktur bainit dan/atau martensit yang memiliki nilai kekerasan yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan struktur campuran ferit dan perlit [3].

METODOLOGI

Potongan pipa ketel uap yang pecah yang digunakan sebagai objek dalam penelitian kerusakan ini diberikan dalam Gambar 1 yang memperlihatkan bagian



Gambar 1. Potongan pipa ketel uap (*boiler tube*) yang pecah yang digunakan dalam penelitian ini.



Keterangan:

Tebal bagian bibir / sisi tube yang pecah

1 = 4,1 mm ; 12 = 4,2 mm

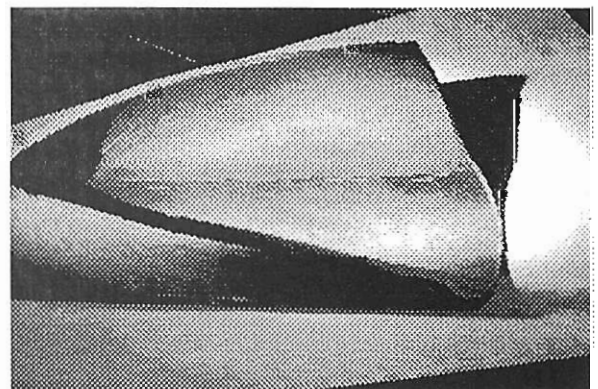
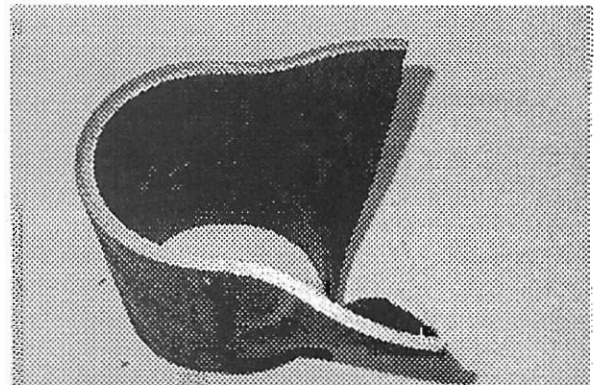
13 = 4,2 mm ; 14 = 4,0 mm

Gambar 2. Dimensi pipa ketel uap yang pecah berikut dengan hasil pengukuran ketebalan

yang pecah dan menggelembung serta dikedua ujungnya memiliki *reducer*.

Potongan pipa ketel uap yang pecah tersebut selanjutnya dipotong pada arah melintang di beberapa lokasi, yaitu satu potongan diambil di bagian tengah pipa yang pecah (Gambar 3). potongan kedua diambil dibagian ujung retakan dan lainnya dipotong pada bagian pipa yang masih utuh (tidak pecah), yang berjarak sekitar 500 mm dari bagian pipa yang pecah.

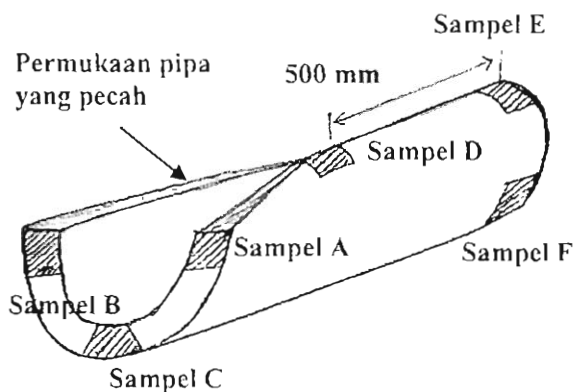
Lokasi pengambilan benda uji (*sample*) pada *boiler tube* ditunjukkan pada Gambar 4. Potongan benda uji selanjutnya di *mounting* dengan epoxy dan setelah itu permukaannya diampelas, dipoles dan dietsa. Etsa yang digunakan adalah Nital. Setelah itu dilanjutkan dengan pengujian metalografi menggunakan mikroskop optik pada pembesaran 100x dan 200x. Pengujian metalografi ini dilakukan di beberapa titik uji yaitu mulai dari bagian dinding luar pipa, bagian tengah dan sampai ke bagian dinding dalam pipa, baik pada bagian pipa yang masih utuh (*normal*) maupun di bagian pipa yang pecah. Berikutnya lalu dilakukan pengujian kekerasan (*hardness test*) menggunakan metode Vickers pada beban 5 kg (HV5). Pengujian kekerasan ini dilakukan di beberapa titik/lokasi untuk menentukan variasi nilai kekerasan yang terjadi pada bagian pipa yang pecah untuk dibandingkan dengan nilai kekerasan di bagian pipa yang masih utuh (tidak pecah).



Gambar 3. Pemotongan bagian pipa yang pecah untuk penyiapan benda uji (*specimen*)

Pengujian selanjutnya adalah menggunakan teknik SEM (*Scanning Electron Microscopy*) yang dilengkapi dengan EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*). Pengujian SEM/EDS ini dilakukan pada permukaan patahan dari bagian pipa yang pecah sehingga dapat ditentukan karakteristik permukaan patahan dan

sekaligus dapat mendeteksi unsur-unsur yang mungkin terkandung di dalam permukaan patahan yang kemungkinan ditengarai ikut memberikan kontribusi terhadap terjadinya kerusakan pada pipa ketel uap tersebut.



Gambar 4. Lokasi pengambilan benda uji (specimen) untuk pengujian metalografi dan kekerasan (*hardness test*).

Keterangan:

- A dan B : Benda uji yang diambil pada bagian sisi tube yang pecah.
- C : Benda uji yang diambil pada bagian sisi tube yang tidak pecah yang berada dibagian seberang sisi tube yang pecah.
- D : Benda uji yang diambil pada bagian ujung sisi tube yang pecah.
- E : Benda uji yang diambil pada bagian sisi tube yang masih utuh yang berada pada bagian sisi yang pecah tetapi berada pada lokasi yang cukup jauh dari bagian sisi tube yang pecah.
- F : Benda uji yang diambil pada bagian sisi tube yang masih utuh yang berada dibagian seberang sisi tube yang pecah tetapi berada pada lokasi yang cukup jauh dari bagian sisi tube yang pecah

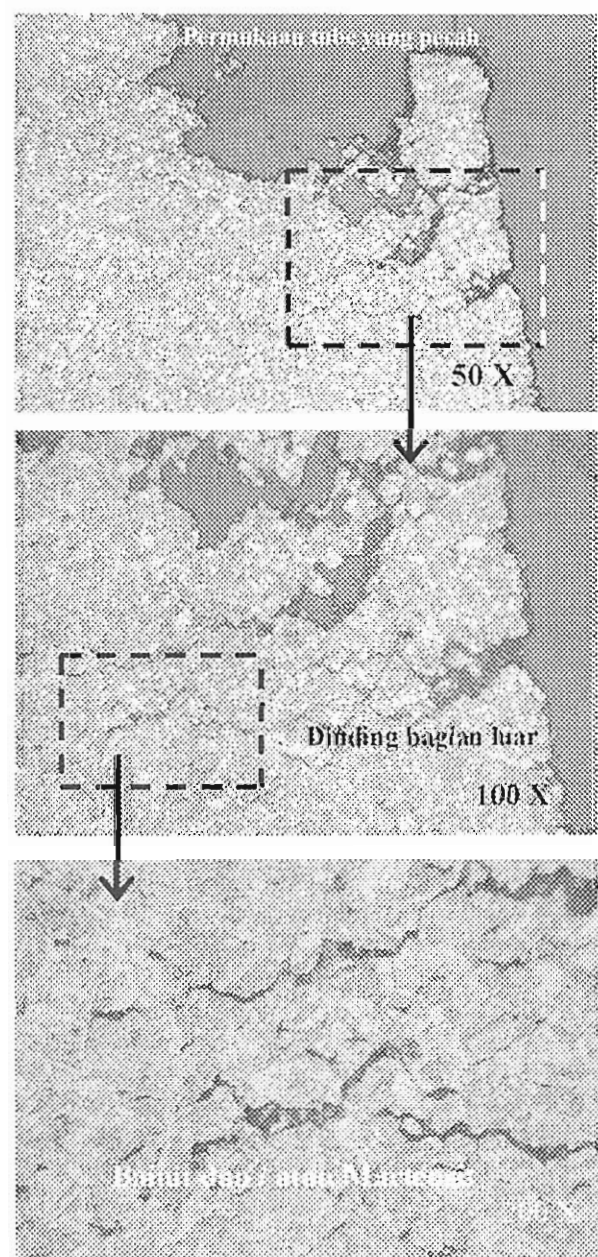
HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil uji visual yang dilakukan terhadap potongan pipa yang pecah tersebut menunjukkan bahwa pada dinding bagian dalam dari pipa tersebut tidak dijumpai adanya pembentukan endapan atau kerak yang berarti. Oleh karena itu dugaan terjadinya panas yang tinggi akibat pengaruh endapan/kerak di bagian pipa yang pecah adalah sangat kecil kemungkinannya. Disamping itu permukaan luar dari bagian pipa yang pecah sama sekali tidak memperlihatkan perubahan warna yang mencolok sebagai tanda-tanda terjadinya oksidasi akibat pengaruh jilatan nyala api dari *burner* yang mungkin langsung mengenai permukaan pipa yang pecah tersebut. Hal ini sekaligus mengkonfirmasi bahwa kerusakan pipa tersebut bukan disebabkan oleh pengaruh panas yang tinggi yang disebabkan oleh sumber nyala api (*burner*).

Hasil uji metalografi sampel A yang berada pada bagian sisi tube yang pecah diberikan pada Gambar 5. Dari berbagai posisi yang di uji, terlihat dengan jelas pada Gambar 5 bahwa hampir seluruh strukturnya

terdiri dari sebagian ferit dan bainit dan/atau martensit. Pembentukan struktur bainit/martensit ini menunjukkan bahwa material pipa ketel uap di bagian pipa yang pecah tersebut pernah mengalami kenaikan suhu yang sangat tinggi yaitu sampai mencapai di atas suhu transformasi baja karbon (723°C). Di atas suhu transformasi tersebut hingga mencapai sekitar 850°C struktur mikro baja yang semula terdiri dari ferit - perlit akan berubah menjadi ferit + austenit [4,5].

Dengan terjadinya transformasi fasa perlit menjadi fasa austenit tersebut maka kekuatan baja akan menurun secara drastis sehingga tekanan fluida yang bekerja di dalam pipa tersebut mampu menimbulkan deformasi plastis yang cukup besar sehingga dapat menipiskan dinding pipa dan kemudian terbentuklah gelembung (*bulging*) yang besar serta pada akhirnya pipa pecah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 dan 2.



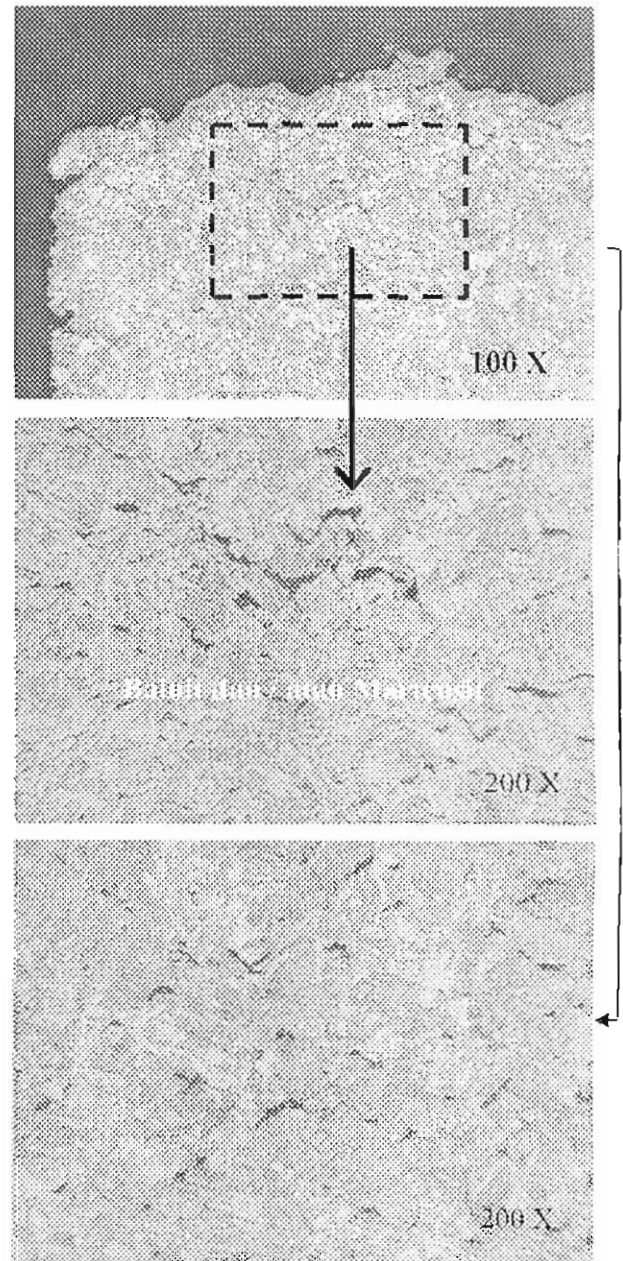
Gambar 5. Hasil uji metalografi sampel A yang berada pada bagian sisi tube yang pecah. (lihat lokasi uji pada Gambar 4).

Pada saat pipa pecah, fluida yang mengalir didalam pipa tersembur keluar dan langsung membasahi bagian pipa yang tadinya suhunya sangat tinggi ($700 - 850^{\circ}\text{C}$) sehingga terjadilah efek pendinginan yang cepat (*quenching*). Efek pendinginan cepat inilah yang menyebabkan terjadinya transformasi fasa dari ferit + austenit menjadi ferit + bainit dan/atau martensit yang sifatnya sangat keras. Disamping itu dari Gambar 5 juga terlihat adanya sejumlah *secondary cracks* yang terbentuk secara *intergranular* di dalam material pipa di sekitar daerah yang pecah dengan mengikuti pola batas butir fasa austenit. Pola retak getas seperti ini nampaknya juga dipengaruhi oleh hidrogen yang terbentuk pada saat pipa pecah (*hydrogen embrittlement*) [6,7].

Hasil uji metalografi pada sampel A lihat Gambar 5 juga diperoleh pada sampel B yang diberikan dalam Gambar 6, yaitu hampir seluruh penampang benda uji di daerah pecahan pipa tersebut menunjukkan struktur mikro ferit + bainit dan/atau martensit yang sangat keras. Disamping itu dari Gambar 6 juga terlihat adanya sejumlah *secondary cracks* yang terbentuk secara *intergranular* yang diperkirakan merambatnya di sepanjang batas butir fasa austenit. Perambatan retak tersebut kemungkinan besar dipengaruhi oleh hidrogen yang terbentuk pada saat pipa ketel uap tersebut pecah (*hydrogen embrittlement*) [6,7].

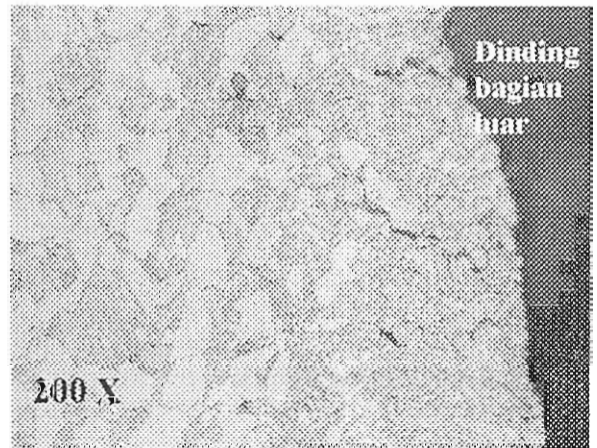
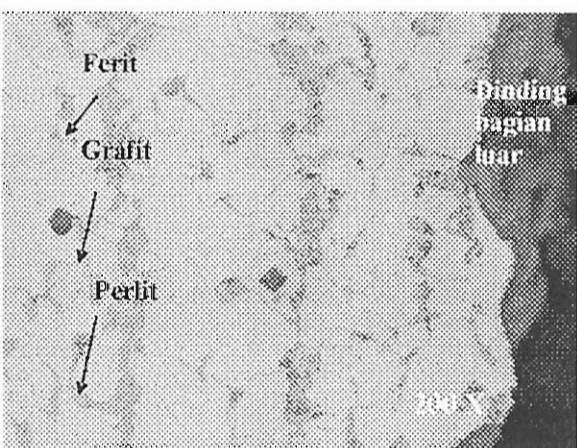
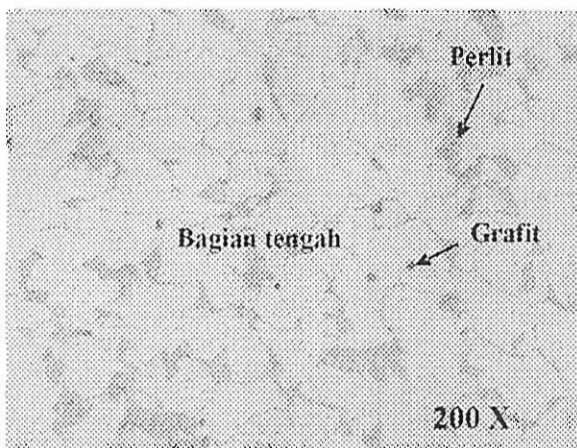
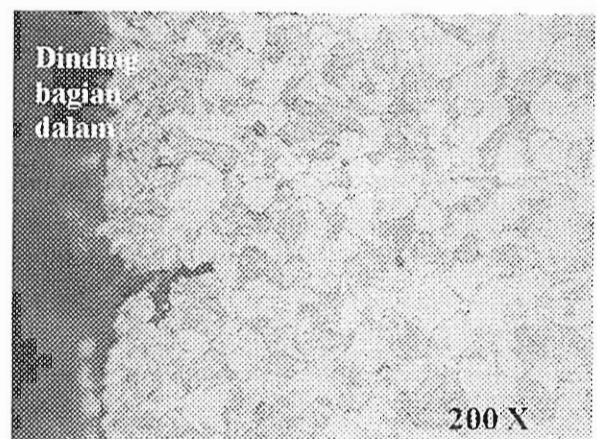
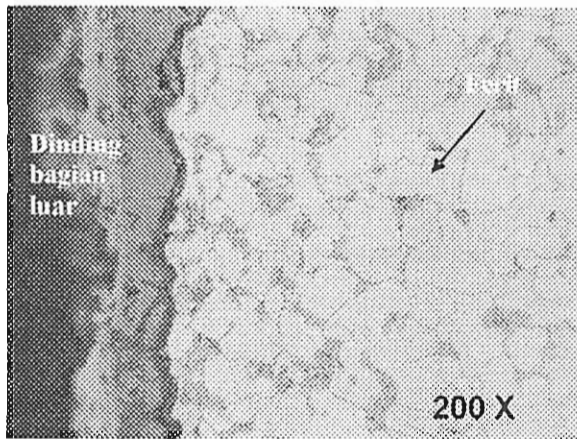
Berbeda dengan sampel A dan sampel B yang diberikan pada Gambar 5 dan 6, sampel C yang diambil pada lokasi dibagian bawah atau yang letaknya berseberangan dengan bagian pipa yang pecah ternyata memperlihatkan struktur mikro yang masih normal yaitu terdiri dari campuran ferit + perlit, lihat Gambar 7. Hal ini menandakan bahwa pada lokasi sampel C tersebut material pipa ketel uap tidak mengalami kenaikan suhu yang sangat tinggi seperti halnya yang terjadi pada lokasi sampel A dan B. Dengan demikian kenaikan suhu yang sangat tinggi yang terjadi pada bagian pipa yang pecah itu kemungkinan besar hanya bersifat lokal (*localized overheating*) dan kejadiannya sangat cepat (*short term*). Dari Gambar 7 juga diperoleh informasi bahwa sebagian fasa perlit telah terdekomposisi menjadi ferit + grafit walau pembentukannya masih dalam tahap stadium awal/stadium dua. Pembentukan grafit biasanya terjadi pada baja karbon yang dioperasikan untuk jangka waktu yang cukup lama pada suhu sekitar $300 - 450^{\circ}\text{C}$. Pada suhu tersebut juga dapat terjadi proses oksidasi yang dapat membentuk lapisan oksida (kerak) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Sejumlah grafit juga terbentuk pada sampel D seperti yang diberikan dalam Gambar 8.

Disamping itu pada Gambar 8 juga diperoleh informasi bahwa sampel D yang lokasinya berada pada bagian ujung retakan tube yang pecah, lihat Gambar 4 kemungkinan mengalami kenaikan temperatur sekitar $650-725^{\circ}\text{C}$ sehingga pembentukan fasa bainit/martensit yang terjadi relatif sangat sedikit dan pembentukannya hanya terbatas di daerah sekitar dinding bagian luar tube.



Gambar 6 Hasil uji metalografi sampel B yang berada pada bagian sisi tube yang pecah. (lihat lokasi uji pada Gambar 4)

Selanjutnya hasil metalografi pada sampel E dan sampel F yang lokasinya sekitar 500 mm dari bagian pipa yang pecah memperlihatkan kecenderungan yang hampir sama lihat Gambar 9 dan Gambar 10, yaitu struktur mikronya terdiri dari ferit + perlit dengan disertai pembentukan sejumlah grafit terutama di sisi dinding bagian luar pipa. Disamping itu sebagian permukaan luar dan permukaan dalam pipa juga sudah tertutup oleh lapisan oksida. Hal ini menandakan bahwa suhu yang terjadi pada permukaan luar material pipa tersebut diperkirakan mencapai sekitar $300 - 450^{\circ}\text{C}$ dan berlangsungnya dalam jangka waktu yang sudah cukup lama[6].



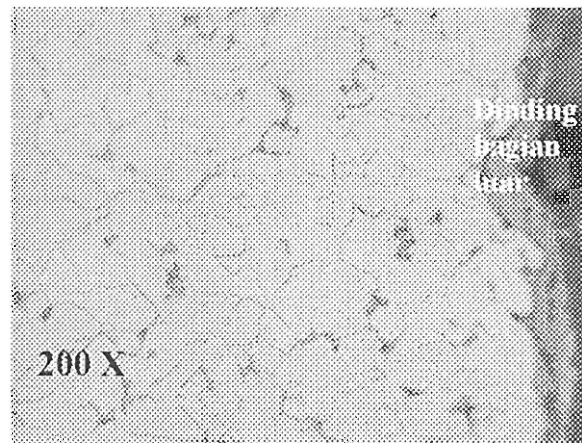
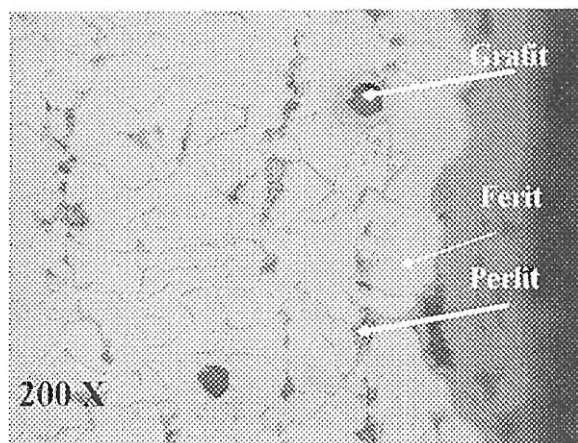
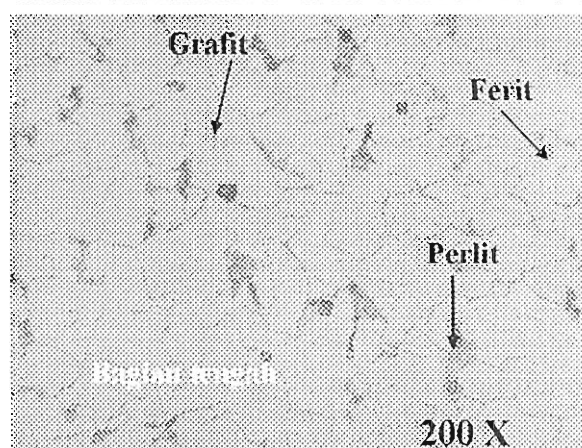
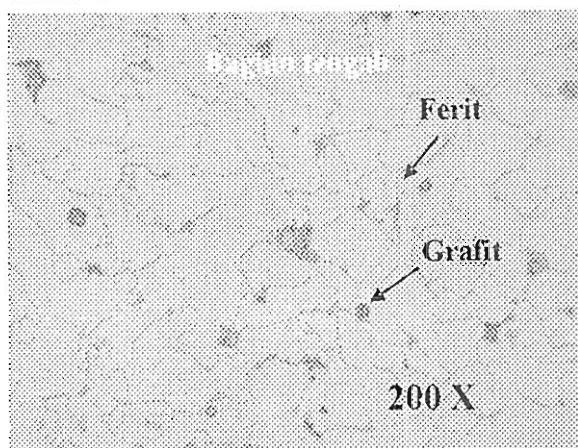
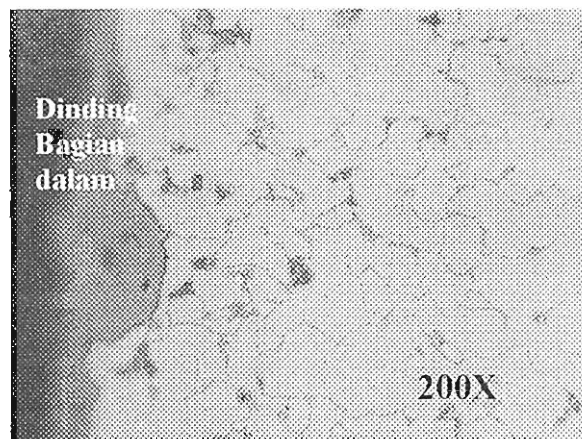
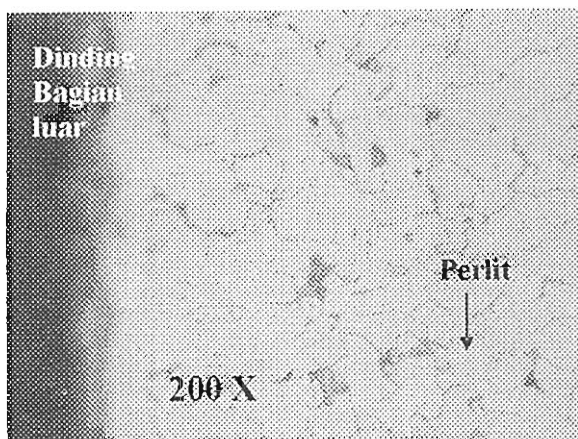
Gambar 7. Hasil uji metalografi sampel C yang berada pada bagian sisi tube yang tidak pecah. (lihat lokasi uji pada Gambar 4)

Gambar 8. Hasil uji metalografi sampel D yang berada pada ujung bagian sisi tube yang pecah (lihat lokasi uji pada Gambar 4).

Hasil uji metalografi seperti yang diberikan pada Gambar 5 s/d Gambar 10 juga di dukung oleh hasil uji kekerasan (*hardness test*) seperti yang diberikan dalam Tabel 1.

Terlihat pada Tabel 1 bahwa nilai kekerasan sampel A dan B mencapai sekitar 250 – 272 HV yaitu jauh lebih tinggi jika dibandingkan dengan kekerasan sampel C, E dan F yang nilainya hanya berkisar antara 150 – 167 HV. Seperti yang telah diuraikan sebelumnya, tingginya nilai kekerasan yang terjadi pada sampel A dan B tersebut

disebabkan oleh pembentukan struktur bainit dan/atau martensit, sementara nilai kekerasan yang relatif rendah yang diperoleh pada sampel C,E dan F disebabkan oleh kondisi struktur mikronya yang masih normal yaitu terdiri dari ferit + perlit. Sedangkan nilai kekerasan yang ditunjukkan oleh sampel D yaitu sekitar 209 HV disebabkan oleh pembentukan fasa bainit/martensit dalam jumlah yang relatif sedikit jika dibandingkan dengan yang terjadi pada sampel A dan B, lihat Tabel 1 dan Gambar 8.



Gambar 9. Hasil uji metalografi sampel E yang berada pada bagian sisi tube yang tidak pecah. (lihat lokasi uji pada Gambar 4).

Gambar 10. Hasil uji metalografi sampel F yang berada pada bagian sisi tube yang tidak pecah. (lihat lokasi uji pada Gambar 4).

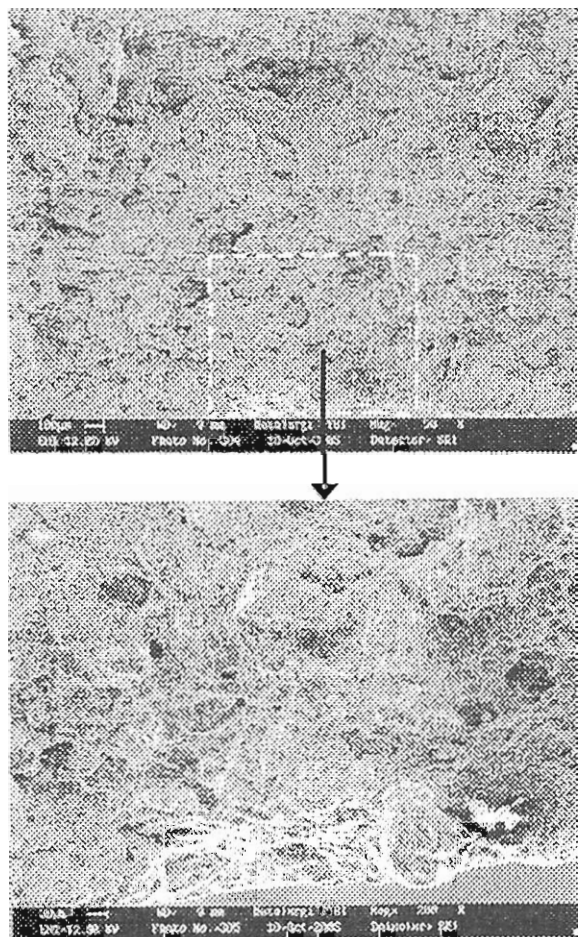
Dari hasil pengujian yang diberikan di atas semuanya saling mendukung dan menunjukkan bahwa jenis kerusakan yang terjadi pada pipa ketel uap (*boiler tube*) termasuk *short term localized overheating* yang temperaturnya diperkirakan mencapai sekitar 700 - 850^o C. Faktor penyebab terjadinya *short term localized overheating* tersebut diperkirakan bukan disebabkan oleh terbentuknya endapan/kerak di dalam dinding pipa ketel uap tersebut dan bukan pula disebabkan oleh efek jilatan nyala api langsung dari *burner*, melainkan yang paling memungkinkan adalah karena faktor rendahnya level air

di bagian pipa yang pecah tersebut. Dugaan rendahnya level air di bagian pipa yang pecah itu juga dapat diperkuat dengan kondisi struktur mikro dan nilai kekerasan material pipa di bagian bawah dari bagian pipa yang pecah itu yang ternyata masih memperlihatkan struktur mikro yang normal yaitu terdiri dari ferit + perlit. Hal ini menandakan bahwa suhu material pipa yang letaknya di bagian bawah dari bagian pipa yang pecah itu kemungkinan besar masih dalam keadaan normal yaitu sekitar 300 - 450^o C sesaat sebelum pipa tersebut pecah.

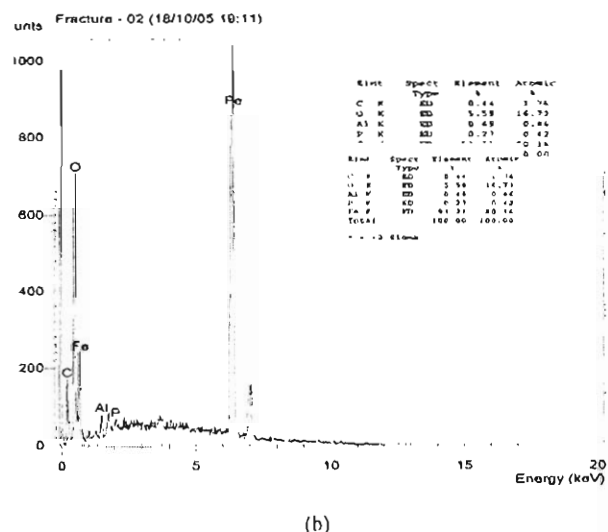
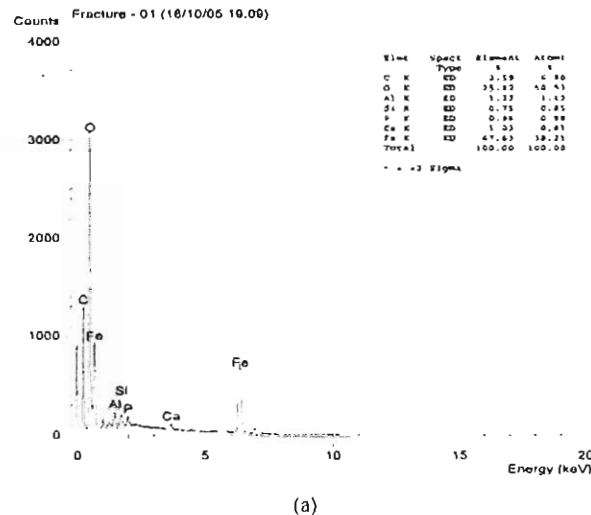
Tabel 1. Hasil Uji Kekerasan (*Hardness Test*)

Titik Uji	Nilai Kekerasan (HV5) pada Lokasi Benda Uji					
	A	B	C	D	E	F
1	268	293	164	210	164	165
2	239	280	162	204	156	148
3	201	269	164	214	151	143
4	227	266	166	210	148	142
5	306	262	172	206	150	148
6	280	257	172	-	-	-
Rata rata	253.5	271.2	166.7	208.8	153.8	149.2

Hasil uji SEM dan EDS yang diberikan pada Gambar 11 dan Gambar 12 (a) & (b) juga menunjukkan bahwa permukaan patahan di bagian dinding pipa yang pecah tersebut pada umumnya memperlihatkan pola perpatahan yang keras dan getas yang dipengaruhi oleh struktur bainit/martensit. Di sana tidak dijumpai adanya pengaruh korosi yang menyebabkan pipa tersebut pecah. Unsur dominan yang terkandung di dalam permukaan patahan pipa seperti yang ditunjukkan oleh hasil uji EDS pada Gambar 12 adalah oksigen yang membentuk ikatan di dalam endapan oksida. Sedangkan unsur-unsur lainnya seperti Ca, P dan Al kemungkinan berasal dari kandungan air ketel uap.



Gambar 11. Hasil uji SEM yang diambil pada permukaan pecahan / patahan dari boiler tube.



Gambar 12. (a) Hasil uji EDS yang diambil pada permukaan pecahan / patahan dari boiler tube pada lokasi 1.
(b) Hasil uji EDS yang diambil pada permukaan pecahan / patahan dari boiler tube pada lokasi 2.

SIMPULAN

Dari hasil penelitian kerusakan yang diperoleh dapat diambil beberapa kesimpulan penting sebagai berikut:

- Jenis kerusakan yang terjadi pada pipa ketel uap (*boiler tube*) adalah *localized overheating* yang berlangsungnya sangat cepat (*short term*). Kerusakan ini ditandai dengan terbentuknya struktur mikro campuran fasa ferit dan bainit dan/atau martensit di daerah sekitar pecahan yang menunjukkan bahwa suhu logam di daerah yang pecah itu pernah mencapai ketinggian sekitar 700 – 850 °C.
- Faktor penyebab terjadinya *short term localized overheating* ini diduga akibat rendahnya level air di bagian pipa tersebut. Hal ini di dukung oleh hasil pengujian yang dilakukan pada bagian bawah dari pipa yang pecah yang menunjukkan struktur mikro ferit + perlit dan nilai kekerasan yang jauh lebih rendah (150 – 167 HV) jika dibandingkan dengan

bagian pipa yang pecah yang terdiri dari struktur mikro ferit + bainit dan/atau martensit dan dengan kekerasan yang sangat tinggi (250 – 272 HV). Disamping itu pada dinding bagian dalam pipa yang pecah itu tidak dijumpai adanya pembentukan kerak (*scale*) yang berarti yang sering disebut sebagai penyebab terjadinya *localized overheating* pada pipa ketel uap. Dugaan faktor lainnya terhadap terjadinya *localized overheating* yang telah menimbulkan kebocoran/pecahnya pipa ketel uap tersebut seperti efek jilatan nyala api dari burner yang mengenai langsung permukaan pipa tersebut nampaknya juga kemungkinannya sangat kecil.

- Struktur mikro material pipa yang berada di luar daerah/bagian pipa yang pecah pada umumnya masih menunjukkan struktur mikro ferit + perlit dengan nilai kekerasan sekitar 150 – 167 HV. Disamping itu hasil pengujian juga menunjukkan bahwa sebagian material pipa ketel uap telah mengalami proses dekomposisi dari perlit menjadi ferit + grafit, walau pembentukannya masih dalam tahap stadium awal/stadium dua.

DAFTAR PUSTAKA

1. *Metallography and Microstructures*, ASM Handbook, Vol 9, 2000, ASM International, Materials Park, Ohio.
2. D.N. Adnyana, *Analisa Metalurgi dan Supervise Perbaikan Poros Forced Draft Fan Sebuah Unit PLTU*, Mesin, Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, 2006, 8 (1) : p.1 - 9.
3. D.N. Adnyana, et. all., *Investigasi Kegagalan dan Analisis Retak Pada SG Steam Superheater*. Prosiding Seminar Nasional Penuaan Peralatan Industri, BPPT, 2003, Jakarta, p.102 – 115.
4. *Failure Analysis and Prevention*, Metals Handbook, Vol. 11, ASM International, Materials Park, Ohio, USA (1999).
5. *Handbook of Case Histories in Failure Analysis*, Vol. 1 and 2, 2000, ASM International, Materials Parks, Ohio, USA
6. *Properties and Selection : Iron, Steels and High Performance Alloys*, Metals Handbook Vol.1, 1999, ASM International, Materials Park, Ohio, USA.
7. *Guide To Engineered Materials*, Advanced Materials and Processes, December 2000, ASM International, Ohio, USA.